

博士（農 学）木瀬道夫

学位論文題名

汎用ロボットトラクタのシステム開発に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、図 56、表 10、引用文献 92、総頁数 104 の和文論文で、他に参考論文 4 編が添えられている。

本研究は RTK-GPS と光ファイバージャイロ(Fiber Optical Gyroscope; FOG)を航法センサとする農用ロボットシステムの実用化に資する基盤技術の開発を目的としている。国内・国外を問わず数多く実施されている従来のロボットトラクタに関する研究では、無人作業システムとして機能するために解決されなくてはならない技術的課題がある。その課題とは、1) 通年作業に対応できる汎用性、2) 無人作業中の安全性、3) 曲線経路に対する追従精度、4) 誰にでも使える操作性、5) 環境の変化や作業中のトラブルに対するロバスト性、等に関する諸機能を満たすことにある。

本システムはその作業対象を耕うん・播種・管理・収穫など農地におけるトラクタ作業とし、いまだ報告例のない通年作業を対象とした“汎用ロボットシステム”についての研究を実施した。得られた成果は下記に要約される。

1) ロボットトラクタのハードウェアの構築（第 2 章）

ロボットトラクタは車両、航法センサの RTK-GPS と FOG、さらにこれらを統括する制御コンピュータによって構成されている。供試車両は操舵、前進・停止・後退の切り替え、車両の速度変速、油圧三点リンクヒッチによる作業機の昇降、エンジン回転数、PTO 回転のオン・オフ、走行ブレーキのオン・オフをコンピュータで制御可能にした。車両の位置計測システムには RTK-GPS を採用した。供試 RTK-GPS の計測精度は 2cm、サンプリング周波数は 20Hz である。車両の方位計測には 3 軸の FOG である IMU を採用した。IMU は光ファイバージャイロと加速度計を 3 個ずつ内蔵している。IMU によって計測された車両のヨー角を航法データとして、ロール角、ピッチ角を GPS アンテナ取付け位置の傾斜補正に用いている。

2) RTK-GPS と FOG のセンサフュージョンによる絶対方位の推定（第 3 章）

航法センサとしての RTK-GPS と FOG の計測精度は優れているものの、FOG 単独では相対方位しか計測できない、またドリフトエラーを発生するという欠点がある。このことは両センサの座標系が時間の経過とともに変化することを意味し、使用にあたってはセンサフュージョン手法を用いて両センサの座標系を一致させる必要がある。本研究では、最小二乗法を適用して絶対方位に対する FOG のバイアス値を逐次推定することにより車両の絶対方位を算出できる手法を考案し、有人走行で得られた車両の軌跡とセンサ情報を適用してこの手法の妥当性を検討した。直線・曲線・旋回など様々な走行データに対してのコンピュータシミュレーション結果からは、ドリフトエラーを含む FOG のバイアス値の推定が可能であることを確認した。

3) 作業計画マップによるロボットトラクタの汎用化（第 4 章）

本章では、開発したシステムが汎用ロボットとして機能するための不可欠な技術要件である「作業計画

マップ」の概念について述べた。作業計画マップは目標経路と共に作業やほ場の情報を合わせ持つ階層構造マップであり、農作業の種類に応じてこのマップを変更することで作業様式に対応することが可能となる。作業計画マップは緯度・経度・コードを要素とするナビゲーションポイントと称する点の集合で構成される。コードには各ナビゲーションポイントにおけるエンジン回転数、車両の速度変速、PTO回転のオン・オフ、作業機の昇降といったロボットへの動作命令や、行程番号などのほ場作業に関する情報が記号化されている。目標経路が点列で構成されていることから曲線を表現することも可能である。これにより、矩形ほ場以外での作業や農道移動など任意の経路走行も可能となる。また、播種時の走行軌跡を次回以降の目標経路とすることによって、さらに精度の高い自律走行が実現できる。本手法を実作業に適用して無人作業を行った結果、目標経路に対して r.m.s. で 4.5cm のオフセット誤差で走行させることができた。

#### 4) 拘束条件を有した経路生成による枕地旋回精度の向上（第 5 章）

枕地旋回のための経路生成アルゴリズムを考案した。枕地旋回を高精度で、かつ高効率に行うことは作業時間の短縮を可能にし、ほ場効率の向上に帰結する。けん引式作業機を装着した前進走行のみで旋回する場合と、直装式作業機を装着した前進と後退を組合せて旋回する場合の 2 種類の旋回法に対して、旋回経路を 3 次スプライン関数により生成した。ロボットトラクタの最小旋回半径と最大操舵速度に関する拘束条件を設け、これらの拘束条件を満たさない場合は経路を再計算して、走行可能な経路を生成させた。

コンピュータによる走行シミュレーションを行った結果、2つの拘束条件を適用することによって、次行程開始地点における偏差が、前進旋回で 7cm (75%)、切り返し旋回で 26cm (83%) 向上し、ここに設定した拘束条件の妥当性が明らかとなった。

#### 5) 最適制御理論に基づいた操舵制御による曲線追従精度の向上（第 6 章）

曲線経路の追従精度向上を目的として、最適制御を適用した操舵制御アルゴリズムを開発した。第 4 章で開発した PI 制御器による手法は主に直線経路を追従させることを目的に開発したものであり、曲線追従の精度を保証するものではない。しかし、ロボットトラクタとして完成度を高めるためには、農道移動や任意経路の走行を可能にする必要があり、曲線追従精度の向上が不可欠である。最適レギュレータを適用した操舵制御アルゴリズムを開発し、第 4 章の手法と曲線経路への追従精度の比較を行った。直角経路、正弦波経路、そして 5 章で考案した前進旋回の経路に対して精度比較を行った結果、すべての経路において第 4 章の手法よりも精度よく追従できることが明らかとなった。また 3.0m/s の高速走行の試験も行った結果、第 4 章の手法と比較して r.m.s. 誤差で 2.1cm (38%) 精度が向上した。

#### 6) ほ場試験による各種無人作業の考察（第 7 章）

本章では、本学農学部附属農場を含む一般農家のほ場で行った作業の結果について考察した。農道走行を含めた播種作業や、曲がった作物列に対する除草、また GPS 衛星の捕捉が困難なほ場でも作業を実施した。これらすべての作業において目標経路からの横方向偏差が r.m.s. 値で 7cm 以下となり、満足な作業精度が得られた。

作業の精度のみならず、ユーザーインターフェースの操作性や、作業中のトラブルに対する安全性・信頼性についても考察し、開発したシステムの総合的な評価を行った。Windows 上で動く GUI ベースのユーザーインターフェースを開発し、取り扱いが平易な操作環境を提供した。さらにキャビン外部に一時停止スイッチを設け、施肥・播種や薬剤散布などの作業における資材補給を可能にした。また安全対策として、作業中にトラブルが発生した場合に備え、100m の遠隔地からリモートコントローラによるエンジンの緊急停止機能が付加されている。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 寺尾 日出男

副査 教授 端 俊一

副査 助教授 野口 伸

## 学位論文題名

### 汎用ロボットトラクタのシステム開発に関する研究

本論文は、図 56、表 10、引用文献 92、総頁数 104 の和文論文で、他に参考論文 4 編が添えられている。

本研究は RTK-GPS と光ファイバージャイロ (Fiber Optical Gyroscope; FOG) を航法センサとする農用ロボットシステムの実用化に資する基盤技術の開発が目的である。従来のロボットトラクタの研究では、無人ほ場作業システムの課題が未解決であり、1) 通年作業に対応できる汎用性、2) 無人作業の安全性、3) 曲線経路の追従精度、4) 誰にでも使える操作性、5) 環境の変化や作業中のトラブルに対するロバスト性、等を満たさねばならない。

本システムは、農作業対象を耕うん・播種・管理・収穫などのトラクタ作業とし、いまだ報告例のない通年作業を対象とした“汎用ロボットシステム”的研究を実施したもので、得られた成果は下記に要約される。

#### 1. ロボットのハードウェアと車両の絶対方位推定

ロボットトラクタは車両、航法センサの RTK-GPS と FOG、さらにこれらを統括する制御コンピュータによって構成されている。供試 RTK-GPS の計測精度は 2cm、サンプリング周波数は 20Hz である。車両の方位計測には 3 軸の FOG である IMU を採用した。IMU は光ファイバージャイロと加速度計を 3 個ずつ内蔵している。IMU によって計測された車両のヨー角を航法データとして、ロール角、ピッチ角を GPS アンテナ取付け位置の傾斜補正に用いている。

FOG 単独では相対方位しか計測できず、またドリフトエラーを発生する。そこで、最小二乗法を適用して絶対方位に対する FOG のバイアス値を逐次推定することにより、車両の絶対方位を算出できる手法を考案し、有人走行で得られた車両の軌跡とセンサ情報を適用してこの手法の妥当性を検討した結果、直線・曲線・旋回など様々な走行データに対してのコンピュータシミュレーションからは、ドリフトエラーを含む FOG のバイアス値の推定が可能であった、と述べている。

#### 2. 作業計画マップによるロボットトラクタの汎用化

汎用ロボットとして機能するための不可欠な技術要件である作業計画マップは、目標経路と共に作業やほ場の情報を合わせ持つ階層構造マップであり、農作業の種類に応じてこのマップを変更することで異なる作業様式に対応することが可能となる。この作業計画マップは、緯度・経度・コードを要素とするナビゲーションポイントと称する点の集合で構成されている。コードには各ナビゲーションポイントにおけるエンジン回転数、車両の速度変速、PTO 回転のオン・オフ、作業機の昇降などロボットへの動作命令や、行程番号などのほ場作業に関する情報が記号化されて

いる。目標経路が点列で構成されていることから曲線走路の表現も可能であり、本手法を実作業に適用して無人作業を行った結果、直線走行時の目標経路に対しては r. m. s. 誤差が 4.5cm で走行させることができた、と述べている。

### 3. 枕地旋回と曲線追従の精度

けん引式作業機を装着して前進走行のみで旋回する場合と、直装式作業機を装着して前進と後退を組合せて切り返し旋回する場合の 2 種類の旋回法に対して、3 次スプライン関数により旋回経路を生成し、ロボットトラクタの最小旋回半径と最大操舵速度に関する拘束条件を設け、これらの拘束条件を満たさない場合は経路を再計算して、走行可能な経路を生成させている。コンピュータによる走行シミュレーションを行った結果、2 つの拘束条件を適用することによって、次行程開始地点における誤差が、前進旋回で 7cm (75%)、切り返し旋回で 26cm (83%) 向上し、ここに設定した拘束条件の妥当性が明らかとなった。

ロボットトラクタの完成度をさらに高めるには、農道移動や任意経路の走行を可能にする必要があり、曲線追従精度の向上が不可欠となる。最適レギュレータを適用した操舵制御アルゴリズムを開発し、上述手法との追従精度の比較を行った結果は、直角経路、正弦波経路、前進旋回経路のすべての経路においてより精度よく追従できることが明らかとなった。また 3.0m/s の高速走行の試験も行った結果からは r. m. s. 誤差で約 2.1cm (38%) ほど精度が向上できた、と述べている。

### 4. ほ場試験による各種無人作業

本学農学部附属農場を含む一般農家のほ場で行った作業の結果からは、農道走行を含めた播種作業や、曲がった作物列に対する除草、また GPS 衛星の捕捉が困難なほ場でも作業を実施でき、これらすべての作業において目標経路からの横方向の r. m. s. 誤差が 7cm 以下と満足な作業精度が得られた。Windows 上で動く GUI ベースのユーザーインターフェースを開発し、取り扱いが平易な操作環境を提供できた、と述べている。

以上より、汎用ロボットトラクタのシステム開発に関する研究成果は、関係学会ならびに生産農業に係わる現場関係者から夢のある技術と高く評価されている。よって審査員一同は、木瀬道夫が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。